

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16192

## 稳定同位素技术分析不同养殖方式下鳙饵料的贡献率

李学梅<sup>1</sup>, 朱永久<sup>1</sup>, 王旭歌<sup>1</sup>, 许德高<sup>1,2</sup>, 杨德国<sup>1</sup>

1. 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 农业部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;
2. 华中农业大学 水产学院, 湖北 武汉 430070

**摘要:** 应用碳氮稳定同位素技术分析不同养殖方式(A组: 施肥; B组: 施肥+1/2投饲; C组: 施肥+投饲; D组: 投饲)围隔中鳙(*Aristichthys nobilis*)肌肉碳氮稳定同位素变化情况, 及其可能摄食饵料的贡献率。结果表明, A组鳙肌肉的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 $(-23.8\pm 0.1)\text{‰}$ 和 $(10.8\pm 0.4)\text{‰}$ , 显著高于B组、C组和D组的值( $P<0.05$ ), 后三者之间没有显著差异。围隔中的食物源有浮游动物、颗粒有机物和饲料, 它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值均低于消费者鳙的同位素值。3种食物在不同养殖方式下的贡献率不同, 浮游动物是A组鳙的主要食物来源, 平均贡献率为 $(65.6\pm 3.2)\%$ , 饲料是另3个组鳙的主要食物来源, 其中B组饲料的贡献率相对较大, 达82.1%。说明投饲鳙后, 鳙对饲料能够较好地吸收利用, 但在池塘中同时培育天然饵料能有效提高饲料的贡献率, 减少投饲量, 降低残饵的污染。本研究旨在实践养殖中合理投饲鳙的管理技术提供理论依据。

**关键词:** 鳙; 碳氮稳定同位素; 施肥; 投饲

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)02-0278-06

鳙(*Aristichthys nobilis*)是四大家鱼之一<sup>[1]</sup>, 在中国大陆, 因其较高的食用和食疗价值, 备受广大消费者的喜爱。近年来, 鳙的养殖规模不断扩大, 产量不断升高, 2014年已占中国淡水养殖总产量的11.1%<sup>[2]</sup>。随着养殖技术的提高, 鳙从传统养殖模式中的配养鱼类逐步转变为主养鱼类, 养殖模式的转变也伴随着其从滤食性到吃饲料食性的变化<sup>[3]</sup>。在养殖实践中, 关于鳙的投喂营养主要局限于个体经验的粗放式添加, 缺乏对天然饵料及饲料相互作用及适宜比例的研究。定量研究鳙食性转变后, 天然饵料及饲料的贡献率能合理确定饲料投入量, 最大程度上节约饲料成本, 增加养殖收益。传统的胃肠内容物分析是研究鱼类食性的主要方法, 虽然该方法操作简易直观, 但存在偶然性, 不能反映已被动物消化吸收的食物及食物的消化难易程度<sup>[4]</sup>。

近年来, 稳定同位素分析方法已被广泛应用到动物的食性研究中, 该方法能更准确地揭示消费者实际同化的食物和食物的综合信息, 反映消费者一定时间内摄取、吸收的食物组成, 同时也可以量化不同食物源对消费者的贡献比例, 分析其摄食策略和消费者食性转变规律<sup>[5-6]</sup>。李斌等<sup>[7]</sup>利用稳定性同位素方法研究了蒙古鲌(*Erythroulter mongolicus mongolicus*)食性的转变, 表明蒙古鲌在生长发育过程中发生了食性转变。Carvalho等<sup>[8]</sup>利用稳定同位素技术研究了土地利用对溪流中5种鱼的食性影响。

本研究基于鳙从滤食天然饵料的配养方式到摄食饲料的主养养殖方式的转变, 利用碳氮稳定同位素技术分析4种不同的投喂方式下鳙摄食饵料的贡献比例, 研究结果不仅可揭示不同投喂方式下鳙的主要食物来源, 而且对于指导实践养殖

收稿日期: 2016-06-21; 修订日期: 2016-08-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31502142); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD25B05).

作者简介: 李学梅(1985-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为鱼类健康养殖. E-mail: lanqian1985@163.com. 朱永久为并列第一作者.

通信作者: 杨德国, 研究员. E-mail: yangdg@yfi.ac.cn

中合理投饲具有重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验对象

实验于 2014 年 4–9 月在中国水产科学研究院长江水产研究所窑湾池塘生态养殖基地进行, 在面积为 2666.4 m<sup>2</sup> 的池塘中建立 12 个围隔, 规格为长 9 m×宽 6 m×高 2.5 m, 无底, 底部四周埋入池底 30 cm, 材料为双面涂塑帆布, 以保证围隔水体不交换。每个实验围隔配备 1 个纳米盘以保证氧气充足。实验分 4 个处理组, A 组: 施肥; B 组: 施肥+1/2 投饲; C 组: 施肥+投饲; D 组: 投饲; 每个处理组 3 个重复。12 个围隔均放养健康鱼种, 平均规格(体重)为 900~1000 g, 16 尾/围隔, 围隔中鳙初始总质量相同, 为 7.6 kg。

实验期间, A 组、B 组和 C 组: 每隔 3 d 施肥 1 次, 单个围隔每次施用量为尿素 200 g+磷酸乙胺 160 g+黄金肽 250 g。B 组、C 组和 D 组: 每天 9:00 和 16:00 各投喂 1 次, 投喂青鱼膨化颗粒饲料(表 1)。其中, C 组和 D 组每天投喂量为鱼体总质量的 2%~3%, B 组为该投饲量的一半。围隔内外水体不交换, 平均水深维持在 1.6 m 左右, 水源为井水, 符合 GB 11607–1989《渔业水质标准》<sup>[9]</sup>。微孔增氧机每天曝气 1 次, 晴天时 13:00 开始曝气 2 h, 阴雨天时午夜 2:00 开始曝气至天明。实验期间养殖水体温度为 21.5~32.2℃, pH 为 7.03~8.93, 溶解氧为 3.20~12.02 mg/L。

表 1 人工饲料成分表

Tab. 1 Analysis of ingredients for supplemental feed

成分 ingredient	含量/% content
粗蛋白 crude protein	32.0
粗纤维 fiber	15.0
灰分 ash	12.0
赖氨酸 lysine	1.8
水分 moisture	10.0
钙 calcium	0.6–2.5
总磷 total phosphorus	0.6–2.2

### 1.2 样品采集和处理

2014 年 9 月末, 实验结束时, (1) 用 13<sup>#</sup>浮游动物网(孔径 0.112 mm)在围隔中央采集大型浮游

动物, 在显微镜下鉴定出围隔中常见的大型浮游动物如秀体蚤、剑水蚤、臂尾轮虫等, 用 450℃ 灼烧 4 h 的铝箔纸包裹, 冷冻保存。(2) 颗粒有机物样品则是将从围隔中央采集的 1 L 水样经 13<sup>#</sup>浮游动物网过滤, 之后用 450℃ 灼烧 4 h 的玻璃纤维滤膜(GF/F Whatman, 直径 47 mm, 孔径 0.7 μm)过滤获得颗粒有机物样品, 滤膜用铝箔纸包裹, 冷冻保存。(3) 从每个围隔内随机捕获 2 尾鳙, 于 MS-222 (250 mg/L)麻醉 5 min, 测量全长、体重后, 取背部白肌。(4) 同时, 收集养殖过程中投喂的饲料, 滤膜用过量的 1 mol/L 盐酸溶液酸化处理, 以便去除可能影响 δ<sup>13</sup>C 测量的碳酸钙和其他碳酸盐, 酸化后的滤膜用蒸馏水冲洗。所有样品在 60℃ 下烘烤至恒重, 用研钵将其研磨成均匀粉末, 封口袋封装后保存于干燥器中待测。

### 1.3 同位素测定

浮游动物、颗粒有机物、饲料和鱼类肌肉中总氮(total nitrogen, TN)、总碳(total carbon, TC)采用 Thermo Flash 2000 元素分析仪进行测定, 同位素比用稳定性同位素质谱仪 IRMS (Thermo-MAT253)进行测定, 所有样品的碳和氮稳定同位素分析均在中国科学院水生生物研究所进行。样品中碳氮稳定性同位素以 δ 值的形式给出, 计算公式为 δ<sub>X</sub> (‰) = [(R<sub>sample</sub>/R<sub>standard</sub>) - 1] × 1000, 其中 X 为 <sup>13</sup>C 或 <sup>15</sup>N; R<sub>sample</sub> 是样本的同位素比值 <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C 或 <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N, R<sub>standard</sub> 是标样的同位素比值。碳氮稳定同位素值分别以相对于国际标准的 PDB(美洲拟箭石)和空气 N<sub>2</sub> 的值计算<sup>[10]</sup>。每测定 10 个样品插入 1 个标准样品, 并随机挑选 1~2 个样品进行复测。样品 δ<sup>13</sup>C 和 δ<sup>15</sup>N 重现精度为 ±0.3‰。

### 1.4 统计分析

采用 SPSS 18.0 软件进行数据统计分析。针对不同处理组样品中浮游动物、颗粒有机物、饲料及肌肉中的 δ<sup>13</sup>C、δ<sup>15</sup>N 做相关性分析。通过独立样本 t 检验分析比较不同处理组鳙的终末体重以及肌肉 δ<sup>13</sup>C 和 δ<sup>15</sup>N 值的差异, 以 P < 0.05 作为差异显著水平。本研究利用碳氮稳定性同位素混合模型估算不同饵料对鳙生长的贡献率<sup>[11]</sup>, A 组(施肥)鳙的食物主要为浮游动物和颗粒有机物, 它们对鳙的 δ<sup>13</sup>C 值的贡献率计算公式<sup>[12]</sup>如下:

$$(\delta^{13}C'_X - \delta^{13}C_M) [C]_X f_X + (\delta^{13}C'_Y - \delta^{13}C_M) [C]_Y f_Y = 0$$

$$f_X + f_Y = 1$$

式中,  $f_X$ 、 $f_Y$  代表每种饲料的贡献率;  $[C]_X$ 、 $[C]_Y$  是每种饲料的碳含量;  $\delta^{13}C'_X$  和  $\delta^{13}C'_Y$  表示  $\delta^{13}C_X$  和  $\delta^{13}C_Y$  富集度修正后, 即增加 1‰ 后的值;  $\delta^{13}C_M$  表示鳙的稳定碳同位素值。

其他处理 B 组、C 组和 D 组鳙的食物主要为浮游动物、颗粒有机物和饲料 3 种的混合物, 它们各自对鳙的  $\delta^{13}C$  值的贡献率通过程序 IsoSource 计算。该程序为 Phillips 等<sup>[13]</sup>通过质量守恒方程的反复迭代编写而成, 可利用  $n$  种同位素确定大于  $n+1$  食物来源联合贡献的可能比例, 提供了每种食物贡献的比例范围。

## 2 结果与分析

### 2.1 碳氮同位素组成分析

不同处理组鳙肌肉碳、氮稳定同位素组成如表 2 所示,  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{15}N$  在 A 组中最大, 平均值分别为  $(-23.8 \pm 0.1)\%$  和  $(10.8 \pm 0.4)\%$ , 最小平均值分别为  $(-25.0 \pm 0.1)\%$  和  $(9.1 \pm 0.3)\%$ , 属于 D 组和 C 组。另外, A 组和 B 组、C 组和 D 组的  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{15}N$

值均存在显著差异, 后 3 个组的值无明显差异。

浮游动物  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{15}N$  平均值分别为  $(-27.6 \pm 1.6)\%$  和  $(7.2 \pm 2.0)\%$ ; 颗粒有机物  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{15}N$  平均值分别为  $(-29.2 \pm 0.8)\%$  和  $(5.4 \pm 1.2)\%$ ; 饲料  $\delta^{13}C$  和  $\delta^{15}N$  平均值分别为  $(-25.7 \pm 0.1)\%$  和  $(4.39 \pm 0.29)\%$  (图 1)。

### 2.2 不同饵料在不同处理组的贡献率

A 组为施肥组, 围隔中鳙的主要饵料组成为浮游动物和颗粒有机物, 计算其平均贡献率分别为  $(65.6 \pm 3.2)\%$  和  $(34.4 \pm 3.2)\%$ 。B 组、C 组和 D 组均有投饵, 围隔中鳙主要饵料组成为颗粒有机物、浮游动物和饲料, 图 2 为以 IsoSource 软件计算得出的不同饵料在各处理组中的贡献范围。其结果显示, B 组、C 组和 D 组中鳙的主要食物来源为饲料, 其贡献范围分别为 67%~100%、48%~100% 和 42%~100%, 平均贡献率分别为 82.1%、71.4% 和 69.4%。浮游动物的贡献范围分别为 0~32%、0~51% 和 0~57%, 平均贡献率分别为 10.8%、17.4% 和 18.6%。颗粒有机物的贡献范围相对较低, 分别为 0~21%、0~33% 和 0~36%, 平均贡献率分别为 7.1%、11.3% 和 12.0%。

表 2 不同处理组鳙肌肉碳、氮同位素含量方差分析

Tab. 2 Results of analysis of variance on muscle stable carbon and nitrogen isotope of bighead carp population of different treatments

同位素 stable isotope	A 组	B 组	C 组	D 组	P
碳同位素值( $\delta^{13}C$ ‰)	$-23.8 \pm 0.1^a$	$-24.5 \pm 0.2^b$	$-24.9 \pm 0.3^b$	$-25.0 \pm 0.1^b$	<0.05
氮同位素值( $\delta^{15}N$ ‰)	$10.8 \pm 0.4^a$	$9.5 \pm 0.3^b$	$9.1 \pm 0.3^b$	$9.2 \pm 0.4^b$	<0.01
终末体重/g final weight	$965.8 \pm 125.3^a$	$1233.6 \pm 343.9^{bc}$	$1188.3 \pm 284.4^{bc}$	$1426.6 \pm 159.0^c$	<0.01

注: a、b 和 c 表示显著相关性 ( $P < 0.05$ )。

Note: a, b and c indicate significant association ( $P < 0.05$ ).

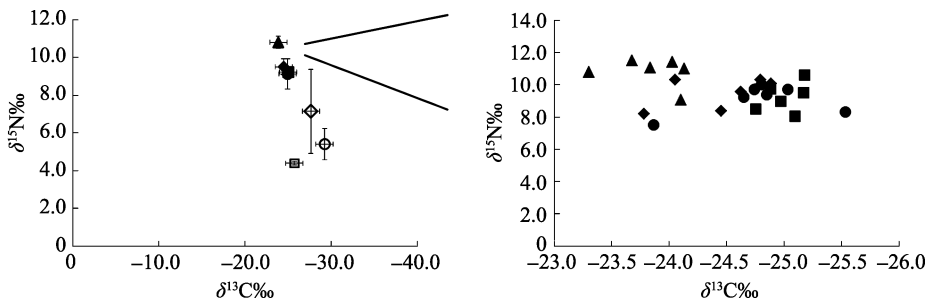


图 1 不同饵料及不同处理组鳙肌肉的碳、氮稳定性同位素组成

○: 颗粒有机物; □: 配合饲料; ◇: 浮游动物; ▲: A 组; ◆: B 组; ●: C 组; ■: D 组。

Fig. 1 Stable isotopes composition of different feeding and different bighead carp muscle

○: particulate organic material; □: compound feed; ◇: zooplankton; ▲: group A; ◆: group B; ●: group C; ■: group D.

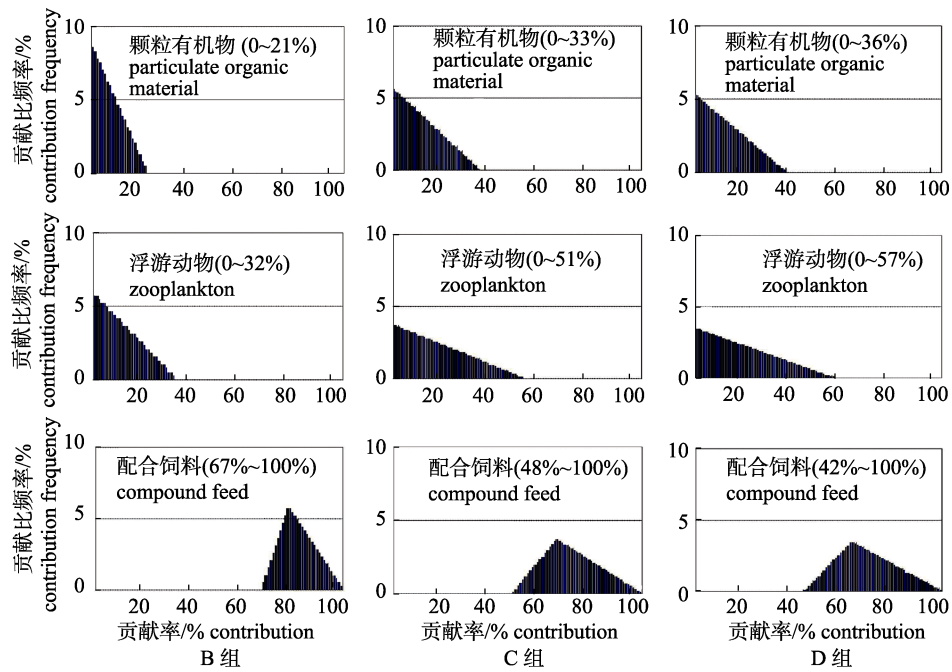


图 2 不同处理组的饵料贡献范围

Fig. 2 Contribution scope of different feed in bighead carp population of different treatments

### 3 讨论

研究表明,动物体内的碳、氮稳定同位素组成会随着食物中碳、氮稳定同位素的变化而发生相应的变化,因此,可通过动物体不同组织(如肌肉)和可能摄取食物的碳、氮稳定同位素值的分析来推断动物的摄食情况<sup>[14-15]</sup>。本研究采用碳氮稳定同位素技术分析不同处理组鳙肌肉中的碳、氮稳定同位素变化情况,及其可能摄食饵料的贡献率。在围隔实验中,不论是 $\delta^{13}\text{C}$ 或 $\delta^{15}\text{N}$ ,A组鳙肌肉同位素值均显著高于B组、C组和D组,后3个处理组鳙的同位素值则差异不显著(表2)。说明鳙在A组中食物源组成与其他3个组有明显的不同,饲料是B组、C组和D组围隔中鳙主要食物源。本研究中A组鳙的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $(-23.8 \pm 0.1)\text{‰}$ ,这与东湖中同样滤食浮游生物的鳙比较( $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-28.1\text{‰}$ )明显增加<sup>[16]</sup>,这可能是受到采样环境和季节的影响。宋固<sup>[17]</sup>指出,千岛湖鳙 $\delta^{13}\text{C}$ 值在9月达到了峰值 $-23.7\text{‰}$ ,与本研究采样季节和结果相似。另外,也可能在养殖过程中,施肥处理A组围隔中天然饵料受摄食压力的影响,数量较少,鳙长期处于饥饿状态。研究表明,当生

物在食物缺乏时,组织中的 $^{13}\text{C}$ 也会增加,其原因主要是呼吸作用将 $^{13}\text{C}$ 较低的 $\text{CO}_2$ 排出体外<sup>[18]</sup>。

Post<sup>[14]</sup>认为,不同营养级生物之间 $\delta^{15}\text{N}$ 富集值通常在 $3.4\text{‰}$ ,营养级越高, $\delta^{15}\text{N}$ 的比率就越高。鳙 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值在A组中显著大于B组、C组和D组,但差值最大为 $1.68\text{‰}$ ,小于 $3.4\text{‰}$ ,说明不同处理组鳙仍处于同一个营养水平。本研究所围隔中,鳙的主要食物来源有浮游动物、颗粒有机物和饲料,它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的值明显低于鳙的同位素值(图1),O'Reilly等<sup>[19]</sup>称消费者的同位素组成相对于其食物的同位素组成会产生一定的富集( $\delta^{13}\text{C}$ 为 $1\text{‰}$ , $\delta^{15}\text{N}$ 为 $3.4\text{‰}$ )。3种食物源中,浮游动物与颗粒有机物 $\delta^{15}\text{N}$ 值相差 $1.74\text{‰}$ ,说明这2种食物源营养级相似,可能与本研究中颗粒有机物包含的生物种类相关, $^{13}\text{C}$ 浮游生物网过滤后的水体中,既含有藻类、细菌、原生动物,也可能包括部分小型轮虫、无节幼体等,后者与浮游动物中秀体蚤、剑水蚤、臂尾轮虫营养级相似。

A组围隔中鳙食物来源为浮游动物和颗粒有机物,其中浮游动物对鳙生长的贡献率达到 $(65.6 \pm 3.2)\%$ ,说明鳙的天然饵料主要是浮游动物,与之前对东湖中鳙食性的同位素研究结果一致<sup>[16]</sup>。

B 组、C 组和 D 组围隔中鳙食物来源为浮游动物、颗粒有机物和饲料, 其中饲料对鳙的生长起到主导作用, 贡献范围最大, 平均贡献率达到 69.4%~82.1%。已有研究表明, 人工饲料对鱼、虾等水生动物的生长贡献率可达 23.0%~83.0%<sup>[20]</sup>, 说明滤食性鳙经投饵驯化后, 对人工饵料的吸收和利用已经适应。本研究中投饵处理的 B 组、C 组和 D 组鳙终末体重明显大于施肥组鳙的体重 ( $P<0.01$ , 表 2), 也在一定程度上证明了这一点。张硕等<sup>[21]</sup>在研究不同饵料碳源对中国对虾生长的贡献率时发现, 在对虾的生长后期, 配合饲料对生长的贡献比例增大, 达到 61.6%, 与本研究结果一致。另外通过比较发现, B 组(施肥+1/2 投饵)的饲料贡献率最大, 平均达 82.1%, 高于 C 组(施肥+投饵)和 D 组(投饵), B 组鳙的终末体重也相对较高(表 2)。说明当池塘中浮游生物饵料丰富时, 适当地投喂鳙, 饲料的贡献率可达到最大。尽管全投饵的 D 组鳙体重明显增大, 但高密度的养殖池塘中, 过量的人工饲料的溶失、残饵及代谢废物累积等可能影响到池塘的水质及底质环境, 进而可能引发池塘病害的暴发<sup>[22]</sup>。因此, 在养殖实践中, 可通过培育天然饵料来降低鳙的投喂量, 在保证饲料利用率的同时也减少了残饵对水环境的污染。

综上所述, 不同养殖方式下鳙肌肉中的碳、氮稳定同位素值不同, 施肥组鳙肌肉  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  同位素值均显著高于组其他 3 个组。浮游动物是施肥组鳙的主要食物来源, 施肥+1/2 投喂、施肥+投喂以及投喂组鳙的主要食物来源则是饲料, 其中施肥+1/2 投喂组中饲料的贡献率相对较大。由此可见, 在鳙的养殖池塘中培育天然饵料, 能提高饲料的贡献率, 减少投喂量, 降低残饵的污染。

#### 参考文献:

- [1] Shi P S. Cloning and expression of fatty acid synthase gene and comparison on growth, muscle quality of *Polyodon spathula* and *Aristichthys nobilis*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. [施培松. 匙吻鲟和鳙的生长、肌肉品质比较及 FAS 基因克隆与表达[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.]
- [2] The Ministry of Agriculture Fishery and Fishery Administration. China Fishery Statistics Yearbook 2015[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015. [农业部渔业渔政管理局. 2015 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.]
- [3] Huang A X, Li X M. Introduction to bighead carp breeding technology[J]. Rural Economy and Science Technology, 2011, 22(12): 32-33. [黄安翔, 黎显明. 浅谈鳙养殖技术[J]. 农村经济与科技, 2011, 22(12): 32-33.]
- [4] Zhou D Y. Feeding habits of lake anchovy (*Coilia ectenes*) in meiliang bay, Taihu lake: stomach content and stable isotope analysis[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. [周德勇. 太湖梅梁湾梅鲢的食性研究: 胃含物和稳定同位素分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.]
- [5] Yang G H, Sun X L, Hou X Q, et al. Measurement of the trophic level of fish in a coral reef ecosystem using stable isotopes[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(1): 105-115. [杨国欢, 孙省利, 侯秀琼, 等. 基于稳定同位素方法的珊瑚礁鱼类营养层次研究[J]. 中国水产科学, 2012, 19(1): 105-115.]
- [6] Bootsma H A, Hecky R E, Hesslein R H, et al. Food partitioning among Lake Malawi nearshore fishes as revealed by stable isotope analysis[J]. Ecology, 1996, 77(4): 1286-1290.
- [7] Li B, Wang Z J, Jin L, et al. Study on diet shift of *Erythroulter mongolicus mongolicus* with stable isotope technology[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 36(9): 1419-1425. [李斌, 王志坚, 金丽, 等. 蒙古鲈食性转变的稳定性同位素研究[J]. 水产学报, 2011, 36(9): 1419-1425.]
- [8] Carvalho D R, Castro D, Callisto M, et al. Isotopic variation in five species of stream fishes under the influence of different land uses[J]. J Fish Biol, 2015, 87(3): 559-578.
- [9] National Environmental Protection Agency. GB 11607-1989 Water Quality Standard for Fisheries[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990. [国家环境保护局. GB 11607-1989 渔业水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.]
- [10] Pi K, Zhang M, Li G C, et al. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers to source artificial organic matter of sedimentary particle in grass carp and yellow catfish polycultured ponds[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(5): 929-937. [皮坤, 张敏, 李庚辰, 等. 人工饵料对主养黄颡鱼和主养草鱼池塘沉降颗粒有机质贡献的同位素示踪[J]. 水生生物学报, 2014, 38(5): 929-937.]
- [11] Phillips D L, Koch P L. Incorporating concentration dependence in stable isotope mixing models[J]. Oecologia, 2002, 130(1): 114-125.
- [12] Wang Y S. Effects of different diets on the feeding and growth of sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka: evidence from stable isotopes[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. [王彦苏. 稳定同位素标记技术分析不同饲料对刺参(*Apostichopus japonicus*)生长及消化吸收的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [13] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [14] Post D. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [15] Becker E L, Cordes E E, Macko S A, et al. Using stable isotope compositions of animal tissues to infer trophic interactions in Gulf of Mexico lower slope seep communities[J].

- PLoS ONE, 2013, 8(12): e74459.
- [16] Xu J. Ecological studies on the food web structures and trophic relationships of freshwater lakes in China using stable carbon and nitrogen isotopes[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005. [徐军. 应用碳、氮稳定性同位素探讨淡水湖泊的食物网结构和营养级关系[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2005.]
- [17] Song G. Feeding habits of silver carp and bighead carp in Qiandaohu Lake[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013. [宋固. 千岛湖鲢、鳙食性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.]
- [18] Perkins S E, Peakman J R. Measuring natural abundance of  $^{13}\text{C}$  respired  $\text{CO}_2$ : variability and implications for non-invasive dietary analysis[J]. *Funct Ecol*, 2001, 15(6): 791–797.
- [19] O'Reilly C M, Hecky R E, Cohen A S, et al. Interpreting stable isotopes in food webs: recognizing the role of time averaging at different trophic levels[J]. *Limnol Oceanogr*, 2002, 47(1): 306–309.
- [20] Julian G D, Pedro C J, Ricardo Z R, et al. Natural carbon stable isotope ratios as indicators of the relative contribution of live and inert diets to growth in larval Senegalese sole (*Solea senegalensis*)[J]. *Aquaculture*, 2008, 280(1–4): 190–197.
- [21] Zhang S, Dong S L, Wang F. Stable isotopic ( $\delta^{13}\text{C}$ ) evaluation of the relative contribution of natural and artificial feed to *Penaeus chinensis*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2001, 8(3): 54–58. [张硕, 董双林, 王芳. 人工配合饲料与天然饵料对中国对虾生长贡献的研究[J]. *中国水产科学*, 2001, 8(3): 54–58.]
- [22] Miao S Y, Wang J Y, Zhang L M. Effects of residual feed and feces on water environment of aquaculture pond[J]. *Feed Research*, 2009(2): 64–68. [苗淑彦, 王际英, 张利民, 等. 水产动物残饵及粪便对养殖水环境的影响[J]. *饲料研究*, 2009(2): 64–68.]

## Using a stable isotope ratio to evaluate the contribution of food to bighead carp (*Aristichthys nobilis*) subjected to different breeding methods

LI Xuemei<sup>1</sup>, ZHU Yongjiu<sup>1</sup>, WANG Xuge<sup>1</sup>, XU Degao<sup>1,2</sup>, YANG Deguo<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;
2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract:** Stable carbon and nitrogen isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) provide a predictable method to evaluate the contribution of food sources to bighead carp (*Aristichthys nobilis*). We measured muscle  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of bighead carp in four treatments, such as fertilization (group A), fertilization + 1/2 feeding (group B), fertilization feeding (group C), and feeding (group D) to analyze variations in the stable isotope ratios and the contribution rates of different food sources. The results showed that the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values in group A tended to be higher than those in the other groups [(-23.8±0.1)‰ and (10.8±0.4)‰, respectively,  $P<0.05$ ]. Zooplankton, particulate organic matter, and artificial feed were the food sources used in the different treatments, and their  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values were lower than those of bighead carp. Zooplankton was a major food source for bighead carp in group A, with a mean contribution rate of (65.6±3.2)%, whereas artificial feed was the main food source in the other three groups, of which the contribution rate in group B was relatively higher (82.1%). These results suggest that artificial feed was absorbed well by bighead carp. However, fertilizing the cultured plankton effectively improved the contribution by artificial feed, decreased the amount of feed, and reduced the pollution caused by residual feed. The present study provides a theoretical basis to invest and culture bighead carp.

**Key words:** *Aristichthys nobilis*; stable carbon and nitrogen isotope ratio; fertilization; feedstuff feeding

**Corresponding author:** YANG Deguo. E-mail: yangdg@yfi.ac.cn